連載

エンジニアの素朴なギモン

第4回 不連続点の整合

ボードの記事　ビギナーズ

小暮裕明

筆者が技術コンサルタントとして多くの企業で経験した問答を紹介する連載の第4回である．今回は，特性インピーダンスと反射について説明し，不連続点の整合法を考える．（編集部）

● 観測点を移動する

新人：図1のバンドパス・フィルタ（本誌2007年9月号，pp.136-138の連載第2回を参照）で気になっているのは先細りの線路です．電流を川に例えると，これでは流れがつかえてしまうので，むしろ線幅を変えない方がよいのではないでしょうか．

先輩： T字の水路では，水があふれることがある．**図2**のTジャンクション（接合点）の場合は，そこから共振部を見込んだインピーダンスと給電線路の特性インピーダンスが合わなければ逆流（反射）すると考えられる．高周波回路では，デバイスにつながる線路の特性インピーダンス[注1]が重要だ．

図3のように観測点（Reference Plane；参照面）を接合点まで移動すると，その位置から見込んだインピーダンスが得られるのですね．共振周波数付近では約140 Ωになりました（**図4**）．

この線路は特性インピーダンスが50 Ωなので，140 Ωの場所に接続すれば反射が大きくなる．そこで線路の幅を次第に狭くして，140 Ωに近づけたと考えられる．

● 電磁界分布と特性インピーダンスの関係

線路が細くなると特性インピーダンスが大きくなるのはなぜでしょうか．

注1：特性インピーダンスとは，伝送線路を励振したときに生じる波（進行波と反射波）を構成する電圧と電流の比，あるいは電界と磁界の比．
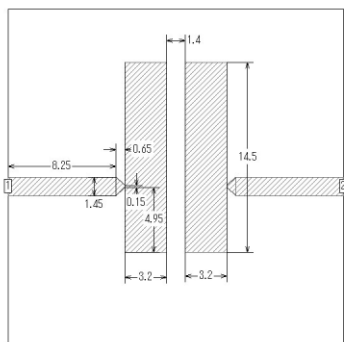
図1　バンドパス・フィルタのモデル
電磁界シミュレータSonnetによるモデル．
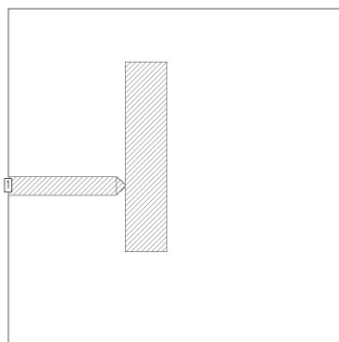
図2　バンドパス・フィルタの左側だけのモデル
5.16GHz付近で共振する．
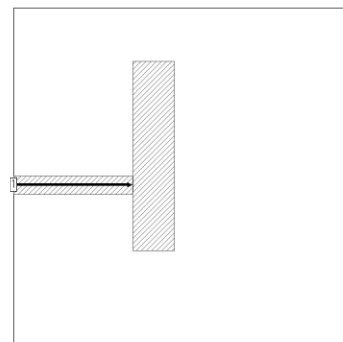
図3　参照面を接合点に移動したモデル
Sonnetのディエンベッド機能を使う．

KeyWord　不連続点，整合，バンドパス・フィルタ，特性インピーダンス，マイクロストリップ線路，パッチ・アンテナ

160 140 120 100 80 60 40 20 0 / 80 60 40 20 0 −20 −40 −60 −80
Z_{in}実部 / Z_{in}虚部
虚部 / 実部
4 4.2 4.4 4.6 4.8 5 5.2 5.4 5.6 5.8 6
周波数［GHz］

図4 接合点から見込んだ入力インピーダンス Z_{in}
実部と虚部を分けて示す．

表面電流を1周積分→電流 i
表面電流
線路とグラウンド間の電界を積分→電圧 v
電界
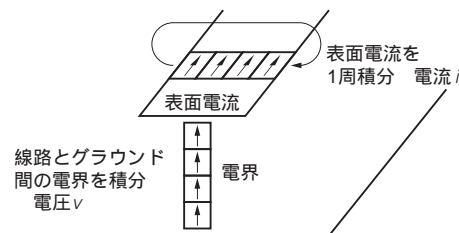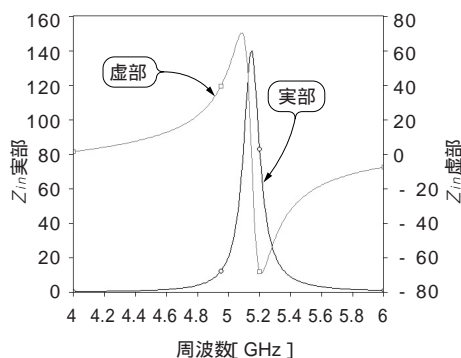
図5 マイクロストリップ線路の特性インピーダンスの考え方
電界を積分して電圧を得る．また表面電流を周回積分して電流を得る．積分路の該当するベクトル素のみを表示している．

図5のようなマイクロストリップ線路で，線路の裏面とグラウンドの間に分布する電界を一つの経路で積分（積算）すると，線路の電圧が得られる．また配線の両面に分布する表面電流を一周に渡って積分すると，線路の電流が得られる．そして特性インピーダンスはこの電圧と電流の比で求められる．

線路の寸法によって電界と磁界の分布が決まりますが，細い線路の方が積分路に集中する電界が強いと考えられます．だから電界と磁界の比は大きくなります．

磁界はどうなるかな．

磁界ベクトルは導体表面に並行で，磁力線は**図5**の周回積分路のようなループ状になります．線路が細くなれば磁界もより集中するから，表面電流も強くなります．しかし積分路はより短くなるから，電流は電圧ほど大きくならずに，結果として特性インピーダンスを高めることになるのでは…．

なるほど．ところで特性インピーダンスの定義は，どこで斬っても金太郎飴のような連続状態が無限に続く線路を想定している．

またしても無限長の線路が出てきました．それでは特性インピーダンスの値は測定できないということになります．

ヘビサイド注2という長距離通信の技術に貢献した電気技師がいる．彼の電信方程式（Lineman's Equation）から特性インピーダンスの概念が導かれた．測定値ではなく理論値なので，特性インピーダンスの定義はいくつかある(2)．マイクロストリップ線路や同軸線路の誘電体は，周波数によって誘電率が異なり，通り抜ける電界も変化する．だからこれらの線路の特性インピーダンスも周波数依存性がある．また線路の導体も周波数によって損失抵抗が異なるから，広帯域で厳密に評価するのは骨が折れる仕事だ．

有限長線路の終端が完全に整合されていれば無反射になります．線路を伝わる電磁波の気持ちになってみると，整合終端の中に入り込めば，ブラック・ホールのように二度と帰ってこられない（つまり無反射）ということですから，これは無限長線路と同じことです．だからこのとき測定したインピーダンスは特性インピーダンスに等しくなります．

● 電磁波はだましだまし

線幅が異なる複数の線路を縦続接続すると，不連続な接続点で反射が起きる．線路長が1/4波長の場合には次の関係があるので，インピーダンス整合に利用されている(1)．

$$Z_{in} = \frac{Z_0^{\,2}}{Z_L} \quad \cdots\cdots (1)$$

知っています．以前パッチ・アンテナで試しました．**図6**のシミュレーション・モデルで，給電点から見込んだインピーダンスが290 Ωだったので，1/4波長線路の入力インピーダンスを50 Ωとするために，式(1)からは約120 Ωになりました．

インピーダンスは50 Ω→120 Ω→290 Ωと変換されるが，値がこのように急激に変化すると帯域幅が狭くなる．これをさらに多段にして，値を少しずつ変換すれば帯域幅は改善できる．

1/4波長ではないが，なめらかに連続変化させたのがテーパ状線路というわけですね．

注2：Oliver Heaviside（1850年～1925年）は，英国の電気技師，数学者．電信会社に勤務し，独学で数学を学び，微分方程式を代数に置き換える演算子法を考案．またマクスウェルの方程式を，現在用いられている形に整理した．

図6 パッチ・アンテナのインピーダンス変換例
給電点から見込んだインピーダンスは290Ω．1/4波長線路の入力インピーダンスを50Ωとするために，約120Ωにする．
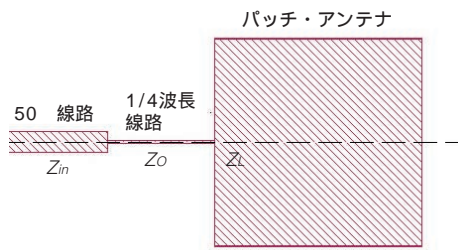
図7 片側短絡型パッチ・アンテナ
パッチの面積を1/4に小型化できる．
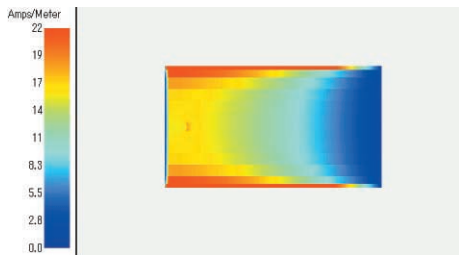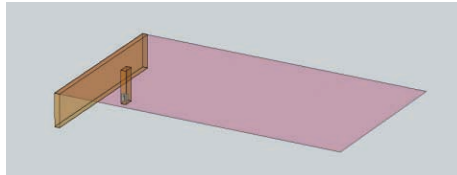
図8 片側短絡型パッチ・アンテナの電流分布
パッチ面に1/4波長の電流分布が認められる．金属厚をゼロに設定したときの結果．

図9 バンドパス・フィルタの表面電流分布例
5.2GHzにおける状態を示す．結合部が共振することで電磁エネルギーがギャップを越えて出力側に伝わっている．
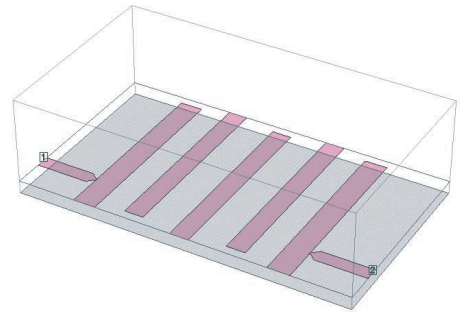
図10 Microstrip Interdigital Bandpass Filter
Sonnetのチュートリアルで解説されている事例．次のWebサイトからダウンロードできるV10日本語マニュアルのSonnet Tutorial．V11ではGetting Started Chapter4 Tutorialに収録されている．SONNETのWebページは，http://www.sonnetsoftware.co.jp/およびhttp://www.sonnetsoftware.com/

一般にテーパ部は図1より長いが，電磁波にも，だましだまし，という手法が使えるのは面白い．しかし図1は二つの共振部が複数のモードで結合しているので，線路の接合点から見込んだインピーダンスは一様ではない．だから通過帯域内のすべての周波数でベストな整合をとるのは困難だ．

それでは電磁界シミュレータを使って詳しく調べてみます．

● 小型化の技法

半波長共振のパッチ・アンテナは，パッチとグラウンドの間の電界が中央でゼロになる．その場所に沿って短絡し，パッチの片方を取り除いた図7のパッチ・アンテナは，パッチの面積を1/4に小型化できる(1)．

短絡部の電圧はゼロですが，電流は逆に最大です．図8のようにパッチ面に1/4波長の電流分布が認められますが，バンドパス・フィルタの共振部（図9）の半分です．

この技法を用いたバンドパス・フィルタが数多く開発されているが（図10），アイデアは尽きない．移動体通信やワイヤレス家電など，小型で高性能の通信用フィルタが必要だから，君にもぜひチャレンジしてもらいたいね．

伝送線路を電磁界の観点で考察することが重要だと痛感しました．

高周波デバイスの開発には避けて通れないから，われわれも勉強し直さないといけないな．

参考・引用*文献

(1) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶワイヤレスの世界，CQ出版社，2006年（第3版）．
(2) 小暮裕明；さまざまな伝送線路と導波管の電磁界，Design Wave Magazine，pp.67-74，2006年8月号．

こぐれ・ひろあき
小暮技術士事務所・技術士（情報工学部門）
http://www.kcejp.com/